

文章编号: 1001-3806(2007)01-0037-04

## 使用双波带板径向剪切干涉仪检测非球面透镜

张 斌<sup>1</sup>, 马 力<sup>2</sup>, 王 鸣<sup>3</sup>, 贺安之<sup>1\*</sup>

(1. 南京理工大学 信息物理与工程系, 南京 210014 2 南昌大学 物理实验中心, 南昌 330047; 3 南京师范大学 物理科学与技术学院, 南京 210097)

**摘要:** 为了实现对光学非球面的低成本在线测量, 在比较和分析现有非球面检测技术的基础上, 设计并制作了一种小型径向剪切干涉仪用于检测非球面透镜。基于波带板可以聚焦成像的原理, 该干涉仪采用不同焦距的双波带板产生径向剪切干涉。波带板由工业缩微矢量图制版技术设计和制作而成, 并通过实验验证了该波带板的聚焦精度。采用傅里叶变换条纹相位分析法对干涉条纹进行处理, 计算出波相差和波面面形。实验中给出了平面波光束经过一个非球面透镜后的波面面形检测结果和误差分析, 使用该技术对标准非球面进行测试, 波差峰谷值 (P-V) 达到了  $\lambda/5$  的精度, 均方差 (RMS) 达到  $\lambda/10$  的精度。结果表明, 该干涉仪具有体积小、抗干扰能力强等特点, 适用于对小型非球面透镜进行在线检测。

**关键词:** 仪器测量与计量; 剪切干涉; 波带板; 非球面

中图分类号: O438 文献标识码: A

## A spheric lens testing by means of compact radial shearing interferometer with two zone plates

ZHANG Bin<sup>1</sup>, MA Li<sup>2</sup>, WANG Ming<sup>3</sup>, HE Anzhi<sup>1</sup>

(1. Department of Information Physics and Engineering Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China 2 Physical Experiment Center Nanchang University, Nanchang 330047, China 3. Department of Physics Nanjing Normal University Nanjing 210097, China)

**Abstract** A spheric surface testing technique with radial shearing interferometer has been developed. The principle of the measurement is based on the radial shearing interference in which the measuring wavefront from the entire mirror surface under test is referred to that of the central part. The compact and low-cost radial shearing interferometer is constructed with two Fresnel zone plates which are designed and fabricated by photographic processing. Radial shearing interferogram is detected by a CCD camera and processed by a computer. Phase of shearing interferogram is evaluated by fast Fourier transform (FFT) algorithm and testing wavefront is reconstructed. The measurement for standard lens show the accuracy to be around  $\lambda/5$  P-V and  $\lambda/10$  RMS. The experiments show that this stable interferometer can be applicable to the in-process measurement for aspheric lens.

**Key words** instrumentation measurement and metrology; shearing interference; zone plate; aspheric surface

### 引 言

非球面的检测是一项复杂的精密测试技术, 它需要结合并运用光学、电子、机械、计算机等领域的知识和技术。由于非球面不同于球面, 其面形千变万化, 现有的各种检测方法都有各自的优缺点, 都有其局限的测量对象。阴影法<sup>[1]</sup>对环境的亮暗条件要求较高, 而且测量结果受主观影响大, 一般适用于对面形误差的定性判断。激光扫描法<sup>[2,3]</sup>可以达到较高精度, 近年来又发展出近似于非接触检测的原子力探针测试

法<sup>[4]</sup>和与干涉仪相结合的扫描探针法<sup>[5]</sup>, 但扫描技术检测非球面数学处理复杂, 而且对机械部分有较高的要求。光干涉法是相对成熟的非球面检测技术, 可以分为双光路干涉和共光路干涉两种。计算全息法 (computer generated hologram, CGH) 是最为常见的双光路干涉测试非球面技术, 将其与相移技术或辅助光学元件相结合, 发展出多种改进的 CGH 测试技术<sup>[6-9]</sup>, 然而该方法对于不同的测试对象需要设计制作不同的全息模板或光学元件, 不具备通用性, 并且会增加测试成本。共光路干涉系统<sup>[10-12]</sup>具有对振动、温度和气流的变化能产生彼此共模抑制的优点, 一般不需隔振和恒温条件也能获得稳定的干涉条纹。因此, 抗干扰能力强的共光路径向剪切干涉法较为适合于设计制成光学在线检测的仪器。作者利用两个不同焦

作者简介: 张 斌 (1978-), 男, 博士研究生, 主要从事光学检测技术的研究。

\* 通讯联系人。 E-mail ha@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2005-12-26 收到修改稿日期: 2006-03-10

距的菲涅耳波带板产生径向剪切干涉,设计并制作了一种适合非球面透镜在线检测的小型径向剪切干涉仪;采用傅里叶变换条纹相位分析法处理干涉条纹,得到准直光通过非球面透镜后的波面信息。

## 1 检测原理

### 1.1 双波带板产生径向剪切干涉的基本原理

剪切干涉是用一定的装置将一个具有空间相干性的波面分裂成两个完全相同或相似的波面,并且这两个波面彼此产生一定量的相对错位,在错位后的两波面重叠区域形成一组干涉条纹。根据错位干涉条纹的形状,并通过一定的分析就可以获得原始波面包含的信息。共光路径向剪切干涉的特点是:同轴的两波前以不同倍率进行缩小和放大后,使两束光的重叠部分进行干涉,产生干涉条纹图像。

菲涅耳波带板是一种重要的光学元件,它是在基板上由一组半径为:  $\rho_k = \sqrt{k\lambda}$  的同心圆构成的明暗相间的环带,其中  $k$  为正整数,  $\lambda$  为光的波长,  $r$  为焦距,各菲涅耳半波带的半径正比于序数  $k$  的平方根。波带板能使点光源成一实像,具有类似透镜成像的功用,其物距和像距所遵从的关系和透镜的物像公式相仿。波带板可以起到两个作用<sup>[11, 12]</sup>——透镜和分光器,即光束通过波带板后一部分直进,一部分发生衍射。图 1 为一种基于双波带板的径向剪切干涉光路系统,

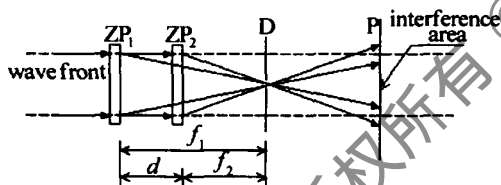


Fig 1 Principle of the radial shearing interference induced by two zone plates

$ZP_1, ZP_2$  为菲涅耳波带板,其起着分光和聚焦的作用,它们的主焦距分别为  $f_1$  和  $f_2$ ,当按  $d = |f_1 - f_2|$  的距离同轴对心置于光路中时,径向剪切比为  $s = f_2/f_1$ 。在波带板主焦点平面上加光阑 D,则通过光阑的光将产生径向剪切干涉,在接收屏 P 上形成剪切干涉条纹。

### 1.2 径向剪切干涉的波面求解

设在极坐标系中待测波面为  $W(R, \theta)$ ,由  $W(R, \theta)$  分束的两相干波面为  $W(r, \theta)$  和  $W(rs, \theta)$ ,其中  $s = f_2/f_1$  是光路系统对  $W(R, \theta)$  的缩放率。径向剪切干涉图的强度分布为<sup>[13, 14]</sup>:

$$I(r, \theta) = |A \exp[ikW(r, \theta)] + A \exp[ikW(rs, \theta)]|^2 = |A|^2 \{2 + 2\cos[kW_{OPD}(r, \theta)]\} \quad (1)$$

式中,  $W_{OPD}(r, \theta) = W(r, \theta) - W(rs, \theta)$  (2) 为两相干光束波相差。(1)式中的振幅  $A$  近似认为是

缓变的。对(2)式作如下处理,以  $s$  乘以(2)式左右两边的径向变量  $r$  得:

$$W_{OPD}(rs, \theta) = W(rs, \theta) - W(rs^2, \theta) \quad (3)$$

重复以上步骤  $n$  次,并且将得到的等式左右累加,得:

$$\sum_{i=0}^n W_{OPD}(rs^i, \theta) = W(r, \theta) - W(rs^n, \theta) \quad (4)$$

由(4)式可知,当  $n$  较大时,等式右边的第 2 项将退化为波面中心点,其波面为常数  $W_0$ ,因此:

$$W(r, \theta) = \sum_{i=0}^n W_{OPD}(rs^i, \theta) - W_0 \quad (5)$$

由于  $W(R, \theta)$  和  $W(r, \theta)$  是相似的,将(5)式两边的  $r$  换成  $R$ ,就得到待测波面:

$$W(R, \theta) = \sum_{i=0}^n W_{OPD}(Rs^i, \theta) - W_0 \quad (6)$$

式中,  $W_{OPD}(Rs^i, \theta)$  可以通过干涉条纹图解调获得。

## 2 共光路径向剪切干涉仪

干涉仪的整个光学系统如图 2 所示。光束由激光

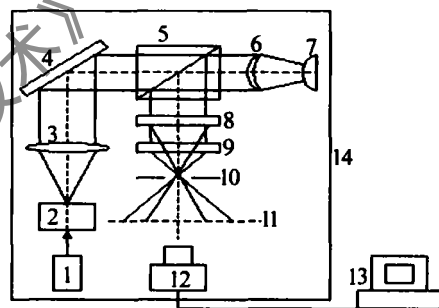


Fig 2 Optical system of the radial shearing interferometer  
1—laser 2—extender lens and filter element 3—lens 4—plane mirror 5—beam splitter 6—spherical lens 7—convex mirror 8—9—zone plate 10—pinhole 11—screen 12—CCD camera 13—computer 14—pedestal

器 1 发出,经过扩束镜与空间滤波器 2 扩束、滤波后被透镜 3 准直。分光棱镜 5 将一部分光向上反射,分离出系统,一部分光直进。将具有高面型精度的凸面镜 7 置于被测非球面透镜 6 后,并满足凸面镜的曲率中心与非球面的焦点重合。光束经过非球面后携带其信息,被凸面镜反射按原路返回,再次经过分束器,光路改变  $90^\circ$ 。波带板 8 波带板 9 将包含被测镜面信息的光束剪切,通过光阑 10 后,在透光屏 11 上产生的干涉条纹由 CCD 摄像机 12 接收,随即传入计算机 13 进行处理。干涉仪实物如图 3 所示。

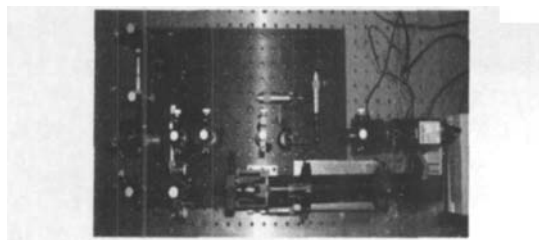


Fig 3 Photograph of the radial shearing interferometer

### 3 条纹图的处理及波面面形的重建

用傅里叶变换条纹分析方法处理干涉条纹<sup>[15 16]</sup>。调制后的干涉条纹光强表示为:

$$g(x, y) = a(x, y) + b(x, y) \cos[2\pi f_0 x + \phi(x, y)] \quad (7)$$

式中,  $a(x, y)$  是背景光强,  $b(x, y)$  是振幅,  $\phi(x, y)$  是波面相位偏差。用傅里叶变换方法分析条纹相位需先将 (7) 式改写为指数形式:

$$g(x, y) = a(x, y) + c(x, y) \exp(2\pi f_0 x) + c^*(x, y) \exp(-2\pi f_0 x) \quad (8)$$

式中,  $j$  和  $*$  代表虚部和共轭,  $c(x, y) = (1/2) b(x, y) \times \exp[j\phi(x, y)]$ 。将 (8) 式对  $x$  进行傅里叶变换:

$$G(f, y) = A(f, y) + C(f - f_0, y) + C^*(f + f_0, y) \quad (9)$$

式中,  $G, A, C$  表示  $g, a, c$  的傅里叶变换,  $f$  表示  $x$  方向上的空间频率。只要载频  $f_0$  足够大, 则在采样区域内, 由  $f_0$  确定的正、负一级谱分量和零级谱就可以充分拉开。在 (9) 式中,  $A(f, y)$  表示的就是零级谱分量, 后两项分别表示正、负一级谱分量。用滤波器取出其中的正一级 (或负一级) 谱分量, 并把该谱分量移频至基点位置, 可得  $C(f, y)$ 。对  $C(f, y)$  进行傅里叶逆变换, 得:

$$c(f, y) = F^{-1}[C(f, y)] \quad (10)$$

再通过反正切函数求出被检波面的相位分布:

$$\phi(x, y) = \tan^{-1} \left\{ \frac{\text{Im}[c(x, y)]}{\text{Re}[c(x, y)]} \right\} \quad (11)$$

式中,  $\text{Im}, \text{Re}$  分别表示复数的虚部和实部。又因为  $\phi(x, y)$  与  $W_{\text{OPD}}(x, y)$  的关系式是:

$$\phi(x, y) = 2\pi/\lambda W_{\text{OPD}}(x, y) \quad (12)$$

由 (6) 式进而可以换算出被检波面在某点的面形差分, 将其对  $x$  积分, 得:

$$W_x(x, y) = \int_{\text{OPD}}(x, y) dx \quad (13)$$

即得到  $x$  方向的波面面形  $W_x(x, y)$ 。同理可以得到  $y$  方向的波面面形  $W_y(x, y)$ 。

在上述分析过程中通常还要进行相位去包裹等操作, 即为了消除采样范围内相位出现  $2\pi$  突变而做的处理: 若后一点相位比前一点相位计算值的增量超过一定的数值, 即认为有  $2\pi$  正跳变, 则从后一点开始将所有点的计算值减  $2\pi$ ; 同样, 若出现  $2\pi$  负跳变时, 将跳变点后的所有点的计算值加  $2\pi$ , 这样即可得到正确的相位数据。

## 4 实验与结果

### 4.1 波带板的设计与制作

波带板使光束发生剪切干涉, 是整个系统的关键元件。本实验中使用的波带板的外径 10mm, 焦距分

别为 150mm 和 200mm。制作波带板时, 先由公式计算出波带数及各波带半径, 将各波带半径按一定比例放大后, 使用 CorelDRAW 绘出波带板的矢量图, 见图 4 发

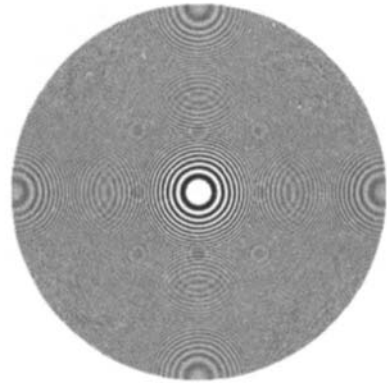


Fig 4 Vectograph of zone plate

排胶片, 再通过工业缩微制版得到波带板成品。对该方法制作的波带板聚焦精度进行实验验证。搭建光路, 以氦氖激光器为光源, 经过扩束、准直后使平行光通过孔径 10mm 的光阑。将焦距为 200mm 的波带板放在光阑后, 用屏接收聚焦后的像。前后调整像距, 使聚焦像点最小, 用 CCD 摄像机拍摄成像屏得到图 5, 测得实际焦距为 199.6mm。波带板的实际焦距与设计焦距的相对误差  $\sigma = |199.6 - 200|/200 = 0.2\%$ 。由此可见, 该波带板满足实验精度要求。

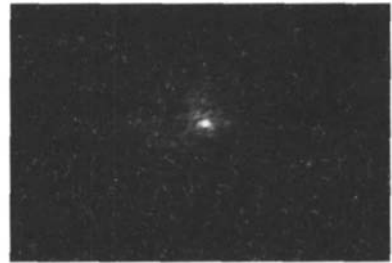


Fig 5 Focusing image by zone plate

### 4.2 非球面透镜的测量

在图 3 所示的干涉仪中, 被检镜为 AS (R51.6389)、 $\varnothing 22.0\text{mm}$  的塑料非球面透镜, 光源使用 1.5mW He-Ne 激光器, 剪切比为  $s = 3/4$ 。由于径向剪切干涉条纹经过调制后只能反映一个方向上的相位信息, 因此对水平 ( $x$ ) 和垂直 ( $y$ ) 方向上的测量操作应分开进行。在水平方向改变两波带板的相对位置, 得到  $x$  方向调制后的干涉条纹, 见图 6。由图像卡转换为数字图像后, 经过一维傅里叶变换的频谱见图 7a 进行滤波、傅里叶逆变换、相位去包裹等操作后, 得到某一截面的条纹相位分布, 见图 7b; 将  $W_{\text{OPD}}(x, y)$  对  $x$  积分后得到某一截面的  $W_x(x, y)$ , 见图 7c; 图 7 中的横坐标表示像素点的个数。图 8 和图 9 分别是整个波面  $x$  方向的波相差和波面面形分布  $W_x(x, y)$ , 图中横、纵坐标值表示计算用图像的实际尺寸, 单位是 mm。

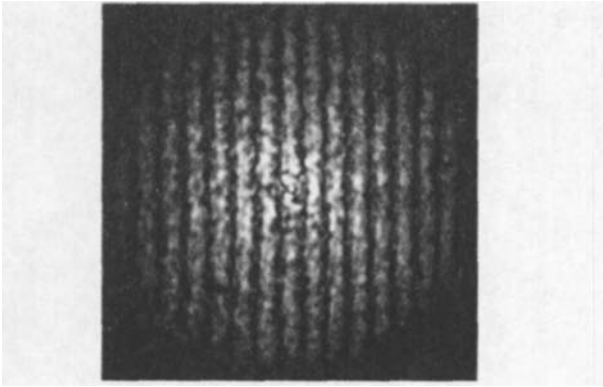


Fig 6 Interference pattern of an aspheric surface with carrier wave

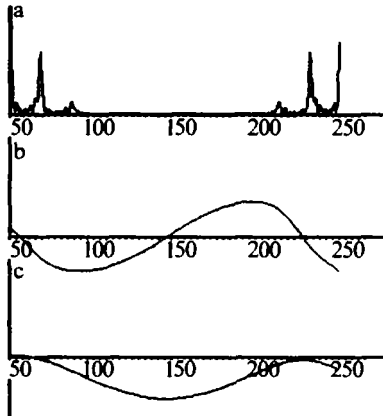


Fig 7 Calculation in one section

a—Fourier spectrum of interference pattern b—the phase distribution in the section c—the wavefront in the section

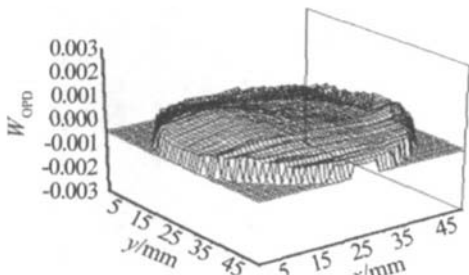


Fig 8 Two-dimensional phase distribution in the x direction

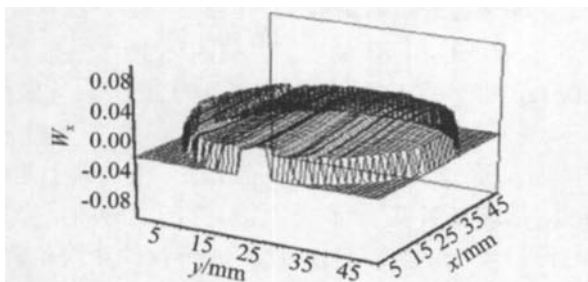


Fig 9 Testing wavefront in the x direction

## 5 讨论

由图 8 可见,波相差的中间部分变化平滑,而上下部分有较大波动和误差。这是由于对每行的傅里叶频谱进行滤波时,各行滤波器的尺寸不可能完全相同所致,而处理时使用的是滤波器的一个近似平均值,必然带来误差。在图像区域里,越靠近上下两边的条纹数

越少,条纹质量也有所下降,使用平均值滤波器造成的误差越明显。此外,采样点数的不同、干涉图像调制量的不同、光阑孔径的不同对测量精度也会有有一定的影响。尽管有这些影响因素,使用该技术对标准非球面的测试结果 P-V (峰谷) 值达到了  $\lambda/5$  的精度, RMS (均方根) 值达到了  $\lambda/10$  的精度,符合在线检测要求。本文中研发的干涉仪采用双波带板产生径向剪切干涉,具有抗干扰性能好、体积小、成本低等优点,适合用于在线检测非球面度和相对孔径不很大的非球面透镜或普通平面镜、球面镜的波相差和波面面形等信息。

由于实际中的透镜有前后两个面和厚度,因此本文中的干涉仪不能直接获得非球面透镜一个面的面形检测。若需要对非球面透镜的一个面的面形进行检测,则需首先获得该非球面透镜标准镜的待测面的面形函数(通过其它方法在测量室里测出或由设计工程师告知),然后与用本文中的干涉仪测得的标准镜的波面相减即可获得另一个面和厚度共同影响的“波面函数”。将其放入处理程序中,用于与待检测透镜的波面进行相减就可获得被检测的面形。因为这部分工作非干涉仪的内容,故没有给出镜面面形测量结果。

## 参考文献

- [1] HAN DO JO A, FRANKEN A H J Testing aspheric surfaces simple method with a circular stop [J]. Appl Opt 1998, 37(25): 5969~5973
- [2] ZHANG X Q, ZHU L Q, DONG M L A new method of surface shape measurement of aspheric optical components [J]. Tool Engineering 2001, 35(4): 24~27 (in Chinese).
- [3] HOU X, WU F, WU Sh B *et al* Study on the measurement of large aperture aspheric surfaces with annular subaperture scanning method [J]. Optoelectronic Engineering 2004, 31(9): 26~28 (in Chinese).
- [4] KEIICHI Y. Ultrahigh accurate 3-D profilometer using atomic force probe [J]. Journal of the Society of Grinding Engineering 2001, 45(12): 562~565
- [5] TOMLINSON R, COUPLAND JM, PETZING J Synthetic aperture interferometry: in-process measurement of aspheric optics [J]. Appl Opt 2003, 42(4): 701~707.
- [6] HWANG T J, KIM S W. Diffraction-grating interferometer for testing aspheric concave mirrors with optimization of fringe visibility [J]. Opt Engng 2004, 43(9): 2124~2128.
- [7] XI Q K, ZHU R H, GAO Zh Sh *et al* Test aspheric with CGH based on a liquid crystal display [J]. Proc SPIE, 2005, 5638: 694~697.
- [8] REICHEL T S, PRUB C, TIZIAN IH J New design techniques and calibration methods for CGH-null testing of aspheric surfaces [J]. Proc SPIE, 2002, 4778: 158~168
- [9] CHANG J LIF Y, WENG Zh Ch *et al* Testing large convex aspherical surface with computer generated holography [J]. Acta Optica Sinica 2003, 23(10): 1266~1268 (in Chinese).
- [10] LIN Y, SCHILL J, WANG R W. Precision evaluation of a common-path interferometer in measurement of optical surfaces [J]. Acta Op-

变散射中心半径大小得到的散射光能量的理论分布相吻合,由此可以推测出入射激光能量密度和碳纳米管悬浮液中形成的碳气泡的大小存在某种关系,即入射能量密度越高,在脉冲作用期间形成的碳气泡的平均半径越大。

图 6 为根据米氏散射理论,计算的一定浓度的碳

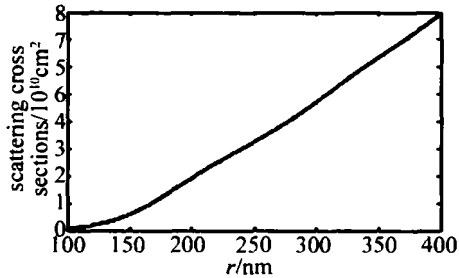


Fig 6 The curve of scattering cross section versus carbon bubble vapour radius

气泡的散射截面随散射半径的变化曲线,从中可以看到,随着碳气泡半径的增加,其散射截面呈非线性增加。由上述一系列实验结果可以得出,碳纳米管悬浮液的光限幅机理可能源于碳纳米管吸收激光能量后升华形成膨胀着的碳气泡对入射光产生强烈的非线性散射。也就是说随着入射激光能量密度的增加,在脉冲作用期间形成的碳气泡的平均半径越大,散射能量随着碳气泡半径的增大呈非线性增加,又碳纳米管对激光的吸收基本上是线性的,从而对入射激光产生了光限幅现象。

#### 4 小 结

综合以上实验和计算结果可以得到,碳纳米管作为一种宽带光限幅材料,其悬浮液的光限幅机理可能源于碳纳米管吸收激光能量后升华,形成快速膨胀的

碳气泡作为非线性散射中心对入射激光产生的强烈的非线性散射。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] GORDEN J P, LEITE R C C, MOORE R S *et al* Long-transient effects in lasers with inserted liquid samples [ J ]. J A P, 1965, 36 ( 1 ): 3~ 8.
- [ 2 ] LEITE R C C, PORTO S P S, DAMEN T C D. The thermal lens effect as a power limiting device [ J ]. Appl Phys, 1967, 10 ( 3 ): 100~ 101.
- [ 3 ] ZHA ZH HU Y. Realization of laser protection using nonlinear optics principles [ J ]. Laser Technology, 1994, 18 ( 2 ): 69~ 73 ( in Chinese).
- [ 4 ] YU D B, SUN X Q, WANG Zh R. The present research of optical limiting materials and their application to laser radiation protection [ J ]. Laser Technology, 1999, 23 ( 5 ): 262~ 266 ( in Chinese).
- [ 5 ] ZHANG P, NIU Y X, GUO Zh X *et al* Application of carbon nanotube in optical limiting [ J ]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41 ( 11 ): 51~ 55 ( in Chinese).
- [ 6 ] VIV IEN L, RIEHL D, LANCON P. Pulse duration and wavelength effects on the optical limiting behavior of carbon nanotube suspensions [ J ]. Opt Lett, 2001, 26 ( 4 ): 223~ 225.
- [ 7 ] SUN X, YU R Q, XU G Q *et al* Broadband optical limiting with multi-walled carbon nanotubes [ J ]. A P L, 1998, 73 ( 25 ): 3632~ 3634.
- [ 8 ] QIAN Sh X, WANG G M. Nonlinear optics [ M ]. Shanghai Fudan University Press, 2001, 126~ 132 ( in Chinese).
- [ 9 ] MANSOUR K, SOLEAU M J, van STRYLAND E W. Nonlinear optical properties of carbon-black suspensions ( ink ) [ J ]. J O S A, 1992, B9 ( 7 ): 1100~ 1109.
- [ 10 ] VIV IEN L, RIEHL D, HACHE F *et al* Optical limiting properties of carbon nanotubes [ J ]. Physica, 2002, B323 ( 3 ): 233~ 234.
- [ 11 ] BELOUSOVA IM, MIRONOVA NG, SCOBELV A G *et al* The investigation of nonlinear optical limiting by aqueous suspensions of carbon nanoparticles [ J ]. Opt Commun, 2004, 235: 445~ 452.
- [ 12 ] BOHREN C F, HUFFMAN D R. Absorption and scattering of light by small particles [ M ]. New York: A Wiley-Interscience Press, 1983, 82~ 129.
- [ 13 ] LID H, ZHAO X F, CHEN H X *et al* Algorithm study of wavefront reconstruction based on the cyclic radial shear interferometer [ J ]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14 ( 2 ): 223~ 227 ( in Chinese).
- [ 14 ] ZHANG Y X, ZHU T, XU Zh Y *et al* Dislocation and branch point in optical front structure theory [ J ]. Laser Technology, 2002, 26 ( 2 ): 97~ 101 ( in Chinese).
- [ 15 ] ZHONG JA, WANG M, LID aCh. Fourier transform moire deflectometry for the automatic measurement of gas temperature field [ J ]. Chinese Journal of Lasers, 1997, 24 ( 3 ): 276~ 280 ( in Chinese).
- [ 16 ] ZHANG L, LU S N, LIN D Y *et al* The progress of extracting phase information based on spatial carrier fringe pattern analysis [ J ]. Laser Technology, 2005, 29 ( 1 ): 90~ 93 ( in Chinese).

(上接第 40页)

tica Sinica, 1994, 14 ( 1 ): 55~ 61 ( in Chinese).

- [ 11 ] KOHNO T, MATSUMOTO D, YAZAWA T *et al* Radial shearing interferometer for in-process measurement of diamond turning [ J ]. Opt Engng, 2000, 39 ( 10 ): 2696~ 2699.
- [ 12 ] WANG M, ZHANG B, SHOUPI NG N *et al* Radial shearing interferometer for aspheric surface testing [ J ]. Proc SPIE, 2002, 4927: 673~ 676.
- [ 13 ] LID H, ZHAO X F, CHEN H X *et al* Algorithm study of wavefront reconstruction based on the cyclic radial shear interferometer [ J ]. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14 ( 2 ): 223~ 227 ( in